

降下火山灰による道路機能障害評価 とその復旧順序決定手法の提案

玉置 哲也*・多々納 裕一**

An Evaluation Method for Road-blockage by Volcanic Ashfall and the Restoration

Tetsuya TAMAKI* and Hirokazu TATANO**

Abstract

In this study, we propose a method for evaluating road dysfunction and restoration after volcanic eruptions. We investigate the impact to a road network and develop functional fragility curves for traffic regulation based on the data from the 2011 eruption at Shinmoe-dake, Mt. Kirishima. In addition, using these estimations, we develop a method for the removal of volcanic ash from roads in the areas where ash falls. As a case study, we select the area damaged by the 2011 eruption at Shinmoe-dake. The study results are compared with the actual damage caused by the volcanic eruption. The analysis of the expected damage using this method prior to a volcanic disaster will lead to increased resilience in cities following the disaster.

キーワード：機能的フラジリティ曲線, 降灰, 道路復旧, 火山リスクマネジメント

Key words: functional fragility curves, ashfall, road restoration, volcanic risk management

1. はじめに

日本列島は環太平洋造山帯の上に位置しており, 世界でも指折りの火山大国である。過去を振り返れば, 例えば, 富士山において1707年に発生した宝永大噴火では, 100km離れた江戸においても数cm程度の降灰が観測された¹⁾。また, 桜島においても有史以来少なくとも3度の大噴火(文明大噴火・安永大噴火・大正大噴火)を起こして

いる。特に大正大噴火では, 火山灰や軽石などのテフラ量は 0.6km^3 と推定されており, その降灰の範囲は鹿児島だけでなく, 全国で観測されている²⁾。一般に, 火山噴火の規模はVEI (Volcanic Explosivity Index) を用いて分類されており, この区分は噴出物の量に基づいている。上記の宝永噴火はVEI5, 大正噴火はVEI4に分類されている³⁾。幸いなことに, 近年はVEI4以上となる大噴火

* 京都大学情報学研究科社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Graduate School of
Informatics, Kyoto University

** 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

は発生していないが、2011年の霧島新燃岳における噴火では交通機関の乱れや農作物の生育不良等といった火山被害が観測されている⁴⁾。また、大きな被害はなかったものの、2013年には桜島でも5000m級の噴火が観測されており、将来予測される大噴火に向けた対策の必要性を再認識させられた。火山噴火によって引き起こされる災害は火砕流、溶岩流、降下碎屑物など複数存在するが、降下火山灰による影響は、風向き次第でかなり広範囲に及ぼされる可能性がある。特に、交通ネットワークが降灰によって被るであろう影響は、交通網の発達した現代社会において甚大なものとなるだろう。

本研究では、火山噴火によって与えられる影響のうち降灰被害に着目し、特に交通ネットワークが被るであろう影響について分析する。現代社会において交通ネットワークは重要インフラの一つであり、大規模な途絶が生じた場合の社会的影響は甚大である。経済活動の復旧や避難・救助について十分な分析を行うためにも、交通ネットワークの被害や復旧を推計することは重要な研究として位置付けることができる。

実際に、噴火に伴う降灰によって道路交通に被害が出た事例も多々ある。1980年アメリカのセントヘレンズ山の噴火⁵⁾では、高速道路における5日間の完全停止（堆積量：7.5cm）、市内交通の5日間の規制（堆積量：1.3cm）が報告されている。また、1995年の桜島噴火⁶⁾では高速道路が約1日停止している。この噴火では、桜島海岸付近で7-8mm程度の堆積が確認されているが、規制が行われた九州自動車道は噴火口から15-20km離れた所に位置しており、堆積量はより少なかったと考えられる。1974年の新潟焼岳の噴火⁷⁾では、1-2mm程度の降灰でも徐行運転になったという報告がある。このような事例からみても、数mm程度の降灰の堆積でも、十分道路交通影響を与える可能性があることが分かる。しかしながら、降下火山灰に対する道路規制の基準は存在しておらず、どの程度の堆積で通行に支障が出るか十分に議論されていないのが現状である。

また、道路交通の途絶による被害を軽減するに

は、早急な復旧が不可欠であるが、そのためには、想定されている被害を十分に把握しておくことと効率のよい復旧計画を立案することが重要である。

道路交通の復旧に着目すれば、降雪を対象とした除雪計画に関する研究はいくつか存在する。例えば、James F. et al.⁸⁾は除雪施策について、最小コストでの具体的なサービスの提供方法について指摘している。また、有村ら⁹⁾は限られた予算内で最適な路面管理を行う方法を、札幌都市圏を対象に分析し提案している。

一方、火山噴火に伴う降灰による交通機能の途絶や回復に関する研究は数少ない。火山災害という観点から見れば、土石流等の危険性に言及している研究はいくらか存在しており、例えば、P. Budetta et al.¹⁰⁾は落石などにより道路が途絶されるリスクについて分析を行っている。また、高橋ら¹¹⁾は雲仙普賢岳の噴火による主要道の被害に触れ、緊急時の対策について取り上げている。このケースでは、噴火の長期化と土石流の発生の懸念により長期間道路が封鎖されていた。しかし、共に降灰の影響についてはほとんど言及していない。

本研究では、こうした降下火山灰に対する道路途絶の可能性に対し、評価を行う手法を提案する。第2章において、概要を説明し、第3章において、道路規制に対して機能的フラジリティ曲線の概念を応用することで、初期の道路途絶確率を求める手段を提案する。第4章では2011年霧島噴火をケーススタディとして、最適な復旧順序を検証し、第5章において、ここで得られた知見についてまとめる。

2. 提案する評価手法の概要

本研究では、火山噴火によって大規模な降灰がもたらされた場合における道路被害とその復旧を評価する手法を提案する（図1）。この評価手法を用いることで、火山噴火による降灰シナリオをもとに、分析対象地域の道路に対する被害程度や復旧にかかる期間、ネットワークの復旧順序を評価することが可能となる。

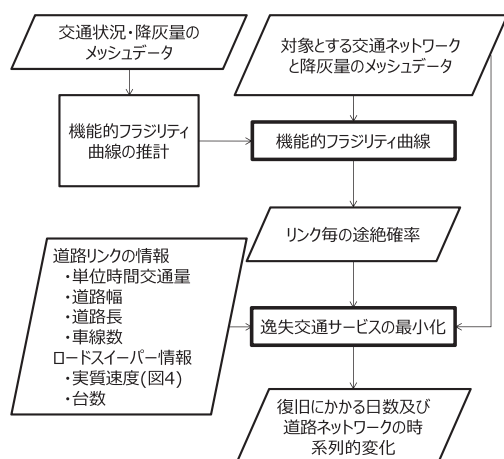


図1 提案手法のフローチャート

ここで提案する手法は、大きく2段階に分けて考えることができる。1段階目として、火山噴火によって降灰が観測された場合の道路の途絶確率を推計する手法を提案し、2段階目として効率的道路を回復させるための除去順序を提案している。

火山噴火による道路交通の途絶を考える場合、雲仙普賢岳の噴火のように、火山噴火近傍の都市においては、火山活動の継続やそれに伴う二次災害のおそれにより道路復旧が難航し、長期間交通規制が行われる可能性がある。一方、大規模噴火が発生した場合、風向きによっては噴火口から遠く離れた大都市においても降灰が観測される場合がある。このような状況では、一刻も早い降灰除去作業が必要となるだろう。また、災害発生直後の救助車両や援助物資を運ぶトラックの必要性を考えれば、道路ネットワークの復旧方法や期間を考えることは重要な意義を持つ。火山災害対策や被害推計は、地震災害等の他の自然災害に比べ、大きく遅れを取っている。このような分析手法を確立することが、今後、火山災害による被害の推計及び対策の提案を行うための基盤になるだろう。

2.1 道路途絶確率の推計

1段階目の手法として、機能的フラジリティ曲線を用いる。フラジリティ曲線¹²⁾は、地震によ

て橋梁や建物などに及ぼされる被害を推計するために開発されたものである。構造物の地震に対する脆弱性に関する要素は、地震動や地盤状況、構造物の種類、地震のタイプなど複数存在する。そのため、ある構造物の脆弱性を調べるためには、構造物毎に要因をすべて検証することが求められる。推計対象の構造物の数が限られていれば、このような方法で推計は可能であるが、推計対象の構造物の数が多い場合には、現実的な方法とは言えない。フラジリティ曲線を用いた推計では、地震動以外の要因を全て不確実性として扱う。複数の要因を厳密に分析していく方法に比べて精度は劣るものの、地震のような大きな空間的広がりをもった災害が発生した場合に、全体的な被害を推計するには画期的な手法であると言える。

このような手法は構造物はもとより、構造物以外の設備¹³⁾や家財¹⁴⁾に対しても応用されてきた。最近では、この手法を企業の操業水準という「機能」に対して応用した「機能的フラジリティ曲線」¹⁵⁾も開発されている。これは、もともと構造物の物理的被害を推計する手法であったフラジリティ曲線が、操業度や生産能力といった「機能」に対しても推計ができるよう拡張されたことを意味している。

本研究では、この機能的フラジリティ曲線を2つの点について拡張を行う。一つ目は、地震動の強度ではなく降下火山灰を要因とする点、もう一つは道路交通規制に適用させる点である。今まで、フラジリティ曲線は広範囲に観測される地震動のみに適用されてきたが、ここでは大規模な噴火による広範囲の降下火山灰への適用を試みる。

また、交通量に関しても、それを低下させる要因は、巻き上げられる灰による視界不良やスリップ事故の危険が高まることによる交通規制、道路の位置や地形的な傾斜等が考えられ複雑であるものの、機能的フラジリティ曲線を用いることで、降灰量以外の要因を不確実性として扱うことができる。特に道路の場合、被災地域のいたるところに存在するため、全体的なネットワークの被害をみるためには、一か所ずつ精査していくことは現実的ではない。また、物流や避難を考える場合に

は、道路の物理的被害よりも道路サービスという機能への影響の方が重要である。以上の理由より、第一段階である道路の途絶確率の推計手法として機能的フラジリティ曲線を提案する。

2.2 道路ネットワークの効率的回復順序の推計

続いて、2段階目として、機能的フラジリティ曲線によって推計された交通ネットワークの各リンクの低下率をもとに、どのようにネットワークが復旧されていくかを分析する方法を提案する。

その方法として、道路整備順位決定問題¹⁶⁾の考え方を適用する。

有村ら⁹⁾は除雪前と除雪後の走行時間費用の差を目的関数とし、それを予算制約のもとで最小化させるような除去順序決定方法を提案し、遺伝的アルゴリズム（以下 GA）を用いて解を求めているが、本研究では、これを降灰除去に適用する。

本研究では目的関数として、逸失道路サービス水準というものを考える。逸失道路サービス水準とは、被害にあわなければ失われることのなかった水準のことであり、ここではそれぞれの道路における低下交通量と低下していた期間の積で表すものとする。この方法は道路間の代替性を無視しているため、最適分析手法とは言えないが、除灰効率の高い道路を選別することができる。そのため、目的関数にこの逸失道路サービス水準の総和を置き、最小化させることで降灰除去順序の優先順位を把握することが可能となる（図2）。

3. 機能的フラジリティ曲線を用いた道路途絶確率の推計

2011年1月19日に、新燃岳において小規模な噴火が発生し、1月26日以降連続的な噴火が観測された。26日から27日にかけて、大量の軽石や火山灰が噴出し、それに伴い、鹿児島県、宮崎県において一部交通規制が取られた。本研究では、この噴火によるデータを用いることで、初期の道路途絶確率を推計する。

3.1 使用するデータ

図1に示すように、機能的フラジリティ曲線を

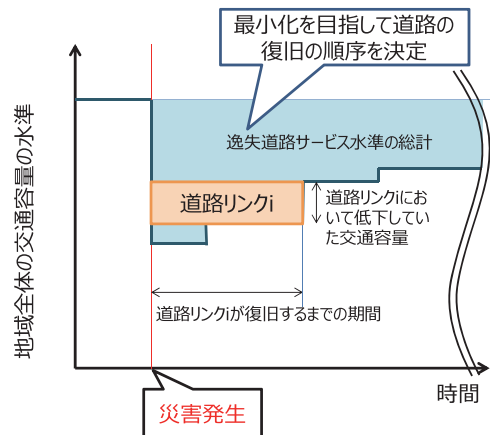


図2 逸失道路サービス水準最小化のイメージ

推計するためには、交通状況及び降灰量のメッシュデータが必要となる。そこで本研究では機能的フラジリティ曲線を推計するために次の噴火データを用いる。

降灰状況のデータとして、産業技術総合研究所・地質調査総合センターにより報告された2011霧島噴出物調査報告書¹⁷⁾を、降灰エリアとその堆積量のデータとして使用する。これは1月26日から27日にかけて、爆発的な噴火によってもたらされた降灰の堆積量が示されたものであり、この噴火後、一部道路で規制が取られている。また、この交通状況に関しては、鹿児島県危機管理局による被害状況の報告書¹⁸⁾を利用する。ここでは規制策が取られた道路とその区間が示されている（表1）。

4分の1地域メッシュを用いて、降灰が観測されたエリアを250mメッシュに分割し、それぞれのメッシュ毎に降灰量、主要道路の有無とその道路の途絶状況を与える。以上より得られた道路のあるメッシュの途絶状況を用いて機能的フラジリティ曲線の推計を行う。降灰が観測されたメッシュのうち、メッシュ内に道路が含まれているものは4185メッシュとなった。図3は降灰と降灰が観測された交通ネットワークをGISで図示したものである。

これらの情報をもとに、得られたデータを用いて推計を試みる。データを整理すると表2の様に

表 1 霧島新燃岳噴火時の交通規制（県道以上）

道路規制	高 速	県管理国道	県 道
1 月 28 日	小林 IC ～ 田野 IC	1 箇所	5 箇所
1 月 31 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	5 か所
2 月 7 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	6 か所
2 月 14 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	6 か所
2 月 21 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	6 か所
2 月 28 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	6 か所
3 月 7 日	通行止め区間無し	国道 223 号線	6 か所

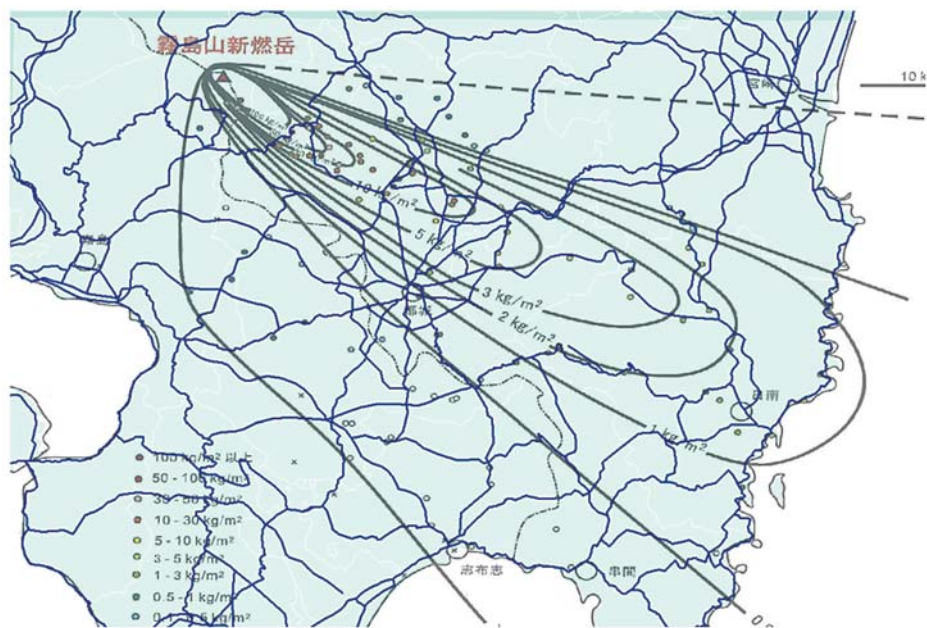


図 3 霧島新燃岳噴火による降灰状況
(産業技術総合研究所による降灰分布を使用)

なる。
表 2 を見てわかるように、降灰量は 9 段階に分かれている。図 4 は、この表をもとに機能的フラジリティ曲線を推計した結果である。ヒストグラムは実際のデータによる割合を示している。

3.2 機能的フラジリティ曲線の定式化

ある道路が火山降灰によって途絶した場合の降灰量（耐力）を x とする。このとき、耐力 x は不確実性を持ち、正規分布に従うと仮定すると、

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

表 2 推計に用いたデータ

降灰量 (kg/m2)	サンプ ル数	道路規制 あり	道路規制 なし	規制割合
0-0.5	2054	41	2013	0.01996
0.5-1.0	720	11	709	0.01528
1.0-2.0	583	14	569	0.02401
2.0-3.0	194	6	188	0.01732
3.0-5.0	231	4	227	0.03093
5.0-10	196	10	186	0.05102
10-30	146	64	82	0.43836
30-50	30	30	0	1
50-100	31	31	0	1

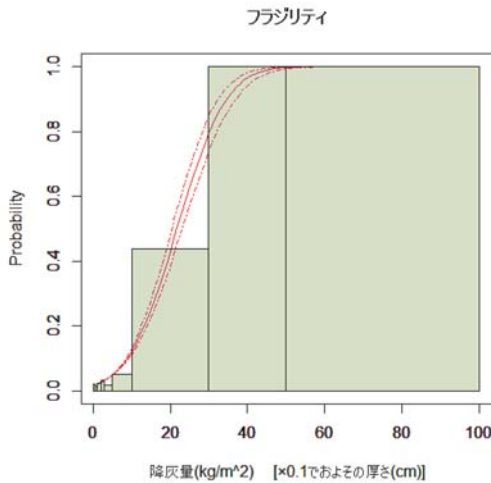


図4 降灰量による交通規制に関する機能的フラジリティ曲線

と書くことができる。つまり、ある道路において降灰量 z が観測された場合、降灰量 z の大きさが耐力 x を超過した場合に道路規制が生じる。したがって、降灰量 z である条件のもとで、道路規制が生じる確率は、

$$P(z) = \int_0^z f(x) dx$$

で表すことができる。サンプル数を N として最尤推定を行う。

$$L(\mu, \sigma) = \prod_i^N P(z_i)^\delta [1 - P(z_i)]^{1-\delta}$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{道路規制あり} \\ 0 & \text{道路規制なし} \end{cases}$$

尤度 L を最大化する平均 μ と分散 σ を決定し、フラジリティ曲線を決定する。図4に示される曲線が、データより推計された機能的フラジリティ曲線となる。

3.3 機能的フラジリティ曲線の推計結果

最尤法によって推計されたパラメータは不確実性を含んでいるため、信頼区間を明らかにしておくべきである。Sinozuka et al.¹²⁾ はフラジリティ曲

表3 パラメータの推計結果

	推計値	モンテカルロ法		
		10%	50%	90%
平均 μ	21.7702	20.4994	21.7886	23.0707
分散 σ	10.0605	9.37515	10.0698	10.7456

線の信頼区間について言及している。本研究では、モンテカルロ法を用いてパラメータの推計を行い、信頼区間を設定した。図4における破線で示された曲線は90%の信頼区間を示している。表3に推計結果を示す。

3.4 交通量の初期低下率

ある火山噴火シナリオによって、降灰が観測される地域及び降灰量が与えられた場合、観測された降灰量から道路リンク毎の初期低下率の推計を行う。ここで、初期低下率とは、降下火山灰の堆積直後の交通量の減少率を指す。250m メッシュに分割されて降灰量が設定されているので、メッシュ i における降灰量を x_i 、道路 l を構成しているメッシュの集合を R_l としたとき、道路 l における最大の降灰量は、

$$x_l^{\max} = \max \{x_i | i \in R_l\}$$

と表すことができる。この値をもとに機能的フラジリティ曲線を適用すれば、道路 l が途絶する確率 p_l を求めることができる。

交通量の初期低下率 λ_l を期待値として表現すると、

$$\lambda_l = 1 \cdot p_l + 0 \cdot (1 - p_l) = p_l$$

となる。本研究では、これを交通量の初期低下率として用いる。

4. 2011年霧島新燃岳を対象とした道路復旧

4.1 噴火による交通量の初期低下率

実際に2011年霧島新燃岳の噴火に適用させることで、ここで提案した手法を検証してみよう。この機能的フラジリティ曲線は2011年霧島新燃

岳のデータを用いているが、図 5a のような推計結果となった。三角形は噴火位置を示しており、そこから 4km 圏内を円で示している。このエリアは 2 月 1 日以降、立ち入り禁止区域に設定された区域である。交通量の低下率が 0.9 以上と出ている道路及び 4km 圏内にある道路では、実際でも規制が取られている。また、低下率が 0.3-0.5 と推計されている道路については、実際に規制が取られている道路がある一方、規制が行われていない道路も見られる。これらの道路では、規制にまでは至らなかったが、実際には降灰の影響で徐行運転や渋滞といった現象が見られた可能性が推測できる。

ここで提案している機能的フラジリティ曲線を用いれば、道路規制は行われていないものの、現実には多少の影響が出ている可能性のある道路を見つけ出すことが可能になる。また、今後より詳細なデータをとれるようになれば、より精度の高い推計が可能となるであろう。

4.2 道路降灰の除去プロセス

降灰が観測された後の除去作業には、降雪のように薬品や塩等で融解を促す方法は使用できないため、物理的に灰を取り除く他ない。その代表的な方法として、ロードスイーパーによる清掃があげ

られる。ロードスイーパーによって吸い込まれた灰は、搭載されているホッパに溜められ、ホッパが満タンになれば、たまった灰をダンプカー等に移し替えられ、処分地に運ばれるというプロセスとなっている。

ロードスイーパーの速度を $v[\text{km/h}]$ で一定とし、たまった灰をダンプカーに積み替える時間を $t[\text{min}]$ 、ホッパ容積を $M[\text{m}^3]$ 、1 回の清掃可能幅を $w[\text{m}]$ とおくと、降灰量が $x[\text{mm}]$ の場合の実質走行速度 $y[\text{km/h}]$ は、

$$y = \frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{t \cdot x \cdot w}{60M}}$$

と表すことができる。

熊谷ら¹⁹⁾の仮定と同様に、走行速度：3km/h、ホッパ容積：2.2m³、清掃幅：3.2m と仮定して降灰量と実質走行速度をグラフで表すと図 6 のようになる。本研究では、この試算方法をもとに完全に除灰が可能となる時間を求める。

4.3 降灰除去にかかる期間

熊谷ら¹⁹⁾は、こうしたロードスイーパーの性能から、都内で 10mm の降灰が観測された場合、全てのロードスイーパー (68 台) を用いて 4 日弱かかる

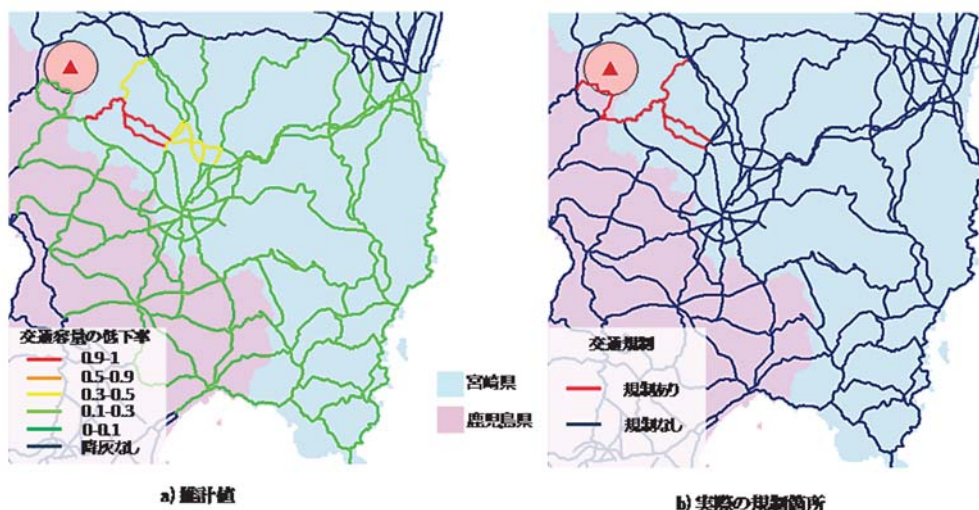


図 5 推計値と実際の規制箇所（一般道のみ）

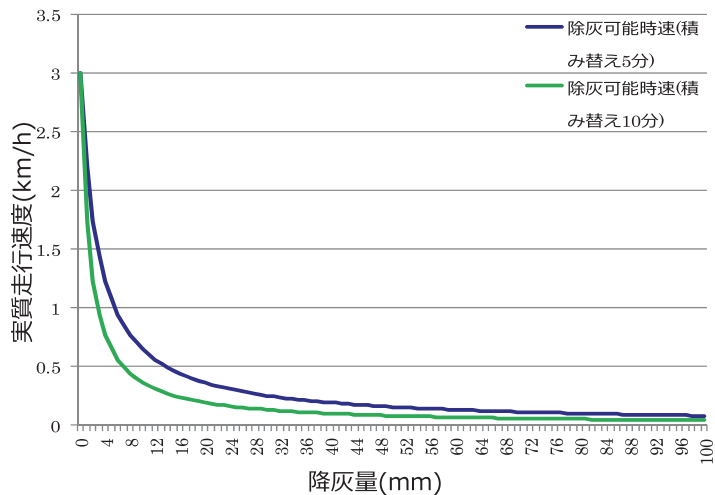


図6 実質的なロードスイーパーの速度

ことを試算している。この結果は単純に、対象地域全ての除灰箇所の面積（道路面積）とロードスイーパーの性能、台数から試算されたものであり除灰順序は考慮していないが、最短除灰期間を概算するのには適している。

同様の手法で2011年霧島新燃岳噴火の場合で推計を試みる。この噴火の場合、最大で10cmほどの堆積が観測がされている。都城市を中心に、鹿児島県、宮崎県において降灰が観測された。また、今回用いた道路ネットワーク上で、降灰が観測された道路リンクの数は207本であり、これらにおいて除灰が必要である。平成22年度道路交通センサスを用いることで、対象とした地域の交通ネットワークの道路長、道路幅、車線数を決定した。この地域で活動できるロードスイーパーの総数を、鹿児島県の全保有台数21台（平成25年4月現在）²⁰⁾とした場合、4.2で示した手法で推計を行うと、3.6日ほどで全ての灰を除去できるという結果になった。

実際には、一度通行止めとなった区間は一カ月以上たっても交通規制が解除されていなかった。これは、火口から4km圏内として規制されたもの及び、規制された道路周辺には住居がなく、主に観光道路として利用されてるためと考えられる。しかし、復旧活動を始めてからどの程度の期間で復旧を終えることができるのかという指標とし

て、この分析は有用なものである。また、噴火口から遠く離れた都市において、風向きにより火山降灰が観測された場合には、迅速な復旧が求められるが、このようなケースに対しても有用な分析と言えるだろう。ただ、この手法では、復旧期間のみしか推計することは出来ず、復旧過程はわからない。そこで、ネットワークの復旧順序についても、逸失道路サービス水準を最小限に抑えるよう除去作業を行うと仮定すれば、次に示す手法で復旧順序も推計することができる。

4.4 除灰順序最適化問題

4.1で求められた交通量の初期低下率をもとに、最適な交通ネットワークの復旧の分析を行う。有村ら⁸⁾の除雪位置最適化問題では、目的関数に走行時間費用の総和を用いていたが、本研究では逸失道路サービス水準の総和を目的関数とする。定式化すると、この目的関数は、

$$\sum_{i=1}^N (T_i \times V_i \times \lambda_i)$$

と表すことができる。ここで N は道路総数（高速道路を除く）、 T_i は清掃開始から道路 i を清掃するまでの経過時間、 V_i は道路 i の交通量、 λ_i は道路 i の降灰による交通量の低下率である。設計変数は

$$\{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_L\}$$

$\{I\}$: 除灰路線番号, L : 除灰路線数

とおける。

普通、これらの問題は順序を決める問題であるため、道路リンク数が増加すれば、清掃順はその階乗通りもあるため、GAなどが用いられるが、ここでは、リンク間の相互関係を考慮していないため、路線ごとの単位時間当たりの逸失道路サービス水準の改善可能性を比較することで解くことが

できる。

分析した結果、もし仮に除灰効率の高い順に除去を行うと仮定すれば、図7のようになる復旧順序となる。対象とした噴火の場合、大きく影響を受けたのは都城市（図7のそれぞれの地図の中央部あたり）であるが、復旧順序の解析結果を見ても、都城市を中心とした道路の除灰効率が高いことが分かる。都城の中心部とその周辺都市をつなぐ道路が、除灰を開始する上で効率のよい回復が見込まれる路線が多いことが分かる。リンクの連

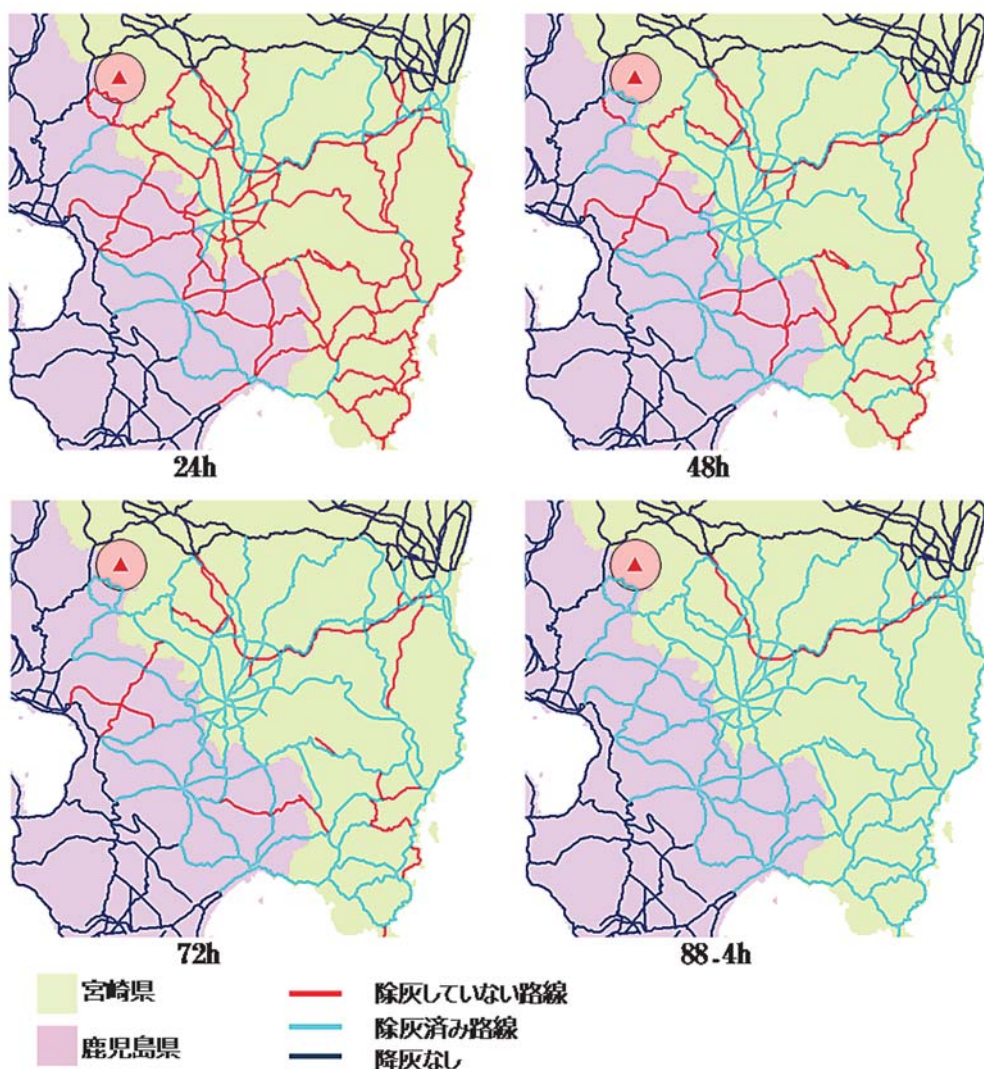


図7 効率的な道路復旧順序（高速道路を除く）

続性を考慮していないため、空間的に大きく離れた場所を連続して除灰しなければならない可能性が出てくるが、除灰効率の高い路線を多く含むよう、除灰経路を決定することで、効率的な復旧の目安とすることができる。また、複数台で除灰を行うことで、一台当たりの移動エリアを狭めることができる。

この噴火の際には、表1で示したように復旧には1カ月以上かかっているが、規制解除後に、仮に逸失道路サービスを最小化するような方法で道路の復旧を行えば復旧の時系列は図7に近い形で復旧されるだろう。

5. おわりに

本研究ではまず、2011年霧島新燃岳における噴火データをもとに、道路の途絶確率に関する機能的フラジリティ曲線を作成した。この推計結果によれば、降灰が1cm程度になると機能停止になる道路が出てくる可能性が高くなり、4cmを越せばほとんどの道路が機能停止となると予測できる。1980年のセントヘレンズ山の噴火では、7.5cm積もった高速道路が5日間完全停止している等の報告がなされており、いくつかの事例と比べてもこの推計手法はそれほどおかしい結果ではない。ただし、霧島新燃岳の噴火による降下火山灰のみで機能的フラジリティ曲線を作成していることも事実である。今後は、噴火と交通状況に関するデータが少ない状況を補うためのより詳細なデータの収集や実験等も検討していく必要があるだろう。

また、一つの仮定の下であるが、道路整備順序を定式化することで、降灰時の復旧過程及び復旧日数を分析することを可能にする手法を示した。一度噴火が発生した場合には、降灰の堆積が確認された以降も火山活動が継続し、それによって交通復旧が遅れる場合がある。しかし、どのような順序で回復されていくかあらかじめ推測できることは、火山災害後のレジリエンスを高めることにもつながる。また、巨大な噴火が発生すれば、風向きによっては噴火火山から遠く離れた大都市においても降灰が観測される可能性がある。大都市においても降灰が観測される場合、交通ネット

ワークの寸断は甚大な経済損失につながる危険性がある。このような状況では、一刻も早く効率のよい降灰除去作業が必要となるだろう。

火山災害における交通状況に関するデータとして、規制箇所に関するものは存在するが、渋滞や徐行が生じた箇所に対しては有用なデータがほとんどない。より詳細なデータがあれば、より精度の高い推計結果を示すことができるであろう。また、本研究では、逸失道路サービス水準というものを定義することで、除去効率の高い道路を順序付けすることができたが、実際の道路ネットワークでは道路の代替性などを考慮しなくてはならない。さらに、道路の清掃方法では、複数車線がある場合には全てを啓開せずに1車線のみ啓開するといった処置がとられる可能性もある。しかし、これらの項目を考慮しようとすれば、リンク間に複雑な相互関係が生じてしまうため、本研究では重点的に取り組まず、除灰順序の目安を出す程度でしか分析を行っていない。今後の課題として、こうした点を考慮した最適除灰順序決定問題があげられる。

参考文献

- 1) 宮地直道・小山真人：富士火山1707年噴火（宝永噴火）についての最近の研究成果，富士火山，pp.339-348，2007.
- 2) 災害教訓の継承に関する専門調査会：1914 桜島噴火報告書，中央防災会議，2章，pp.33-79，2011
- 3) 鈴木毅彦：東京とその周辺における火山災害の歴史と将来，地学雑誌，Vol.122，No.6，pp.1088-1098，2013.
- 4) 内閣府，霧島（新燃岳）の噴火による被害状況等について，<http://www.bousai.go.jp/updates/110128kirishima/110128kirishima.html>，2014年7月16日
- 5) 気象庁，「降灰予報の高度化に向けた検討会」（第1回）の概要について，参考資料2，降灰の影響及び対策，<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kouhai/kentokai/1st/sankou2.pdf>，2014年7月16日
- 6) 京都大学防災研究所付属桜島火山観測所・東京大学地震研究所：1995年8月24日の桜島南岳の噴火と最近の火山活動，火山噴火予知連絡会，Vol.63，pp.88-91，1995.

- 7) 須藤茂: 降下火山灰災害－新聞報道資料から得られる情報, 地質ニュース, No.604, pp.41-65, 2004
- 8) Campbell, James F., and A. Langevin: Operations management for urban snow removal and disposal, Transportation Research Part A, Policy and Practice Vol.29, No.5, pp.359-370, 1995.
- 9) 有村幹治・上西和弘・杉本博之・田村亨: 最適除雪道路選択モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.387-391, 1999.
- 10) Budetta, P.: Assessment of rockfall risk along roads, Natural Hazards and Earth System Science, Vol.4, No.1, pp.71-81, 2004
- 11) 高橋和雄・藤井真: 長期化・大規模化した雲仙普賢岳の火山災害における道路・鉄道の被害と復旧, 土木学会論文集, Vol.567, pp.1-18., 1997
- 12) Shinozuka, M., M.Q. Feng, J. Lee, and T. Naganuma,: Statistical analysis of fragility curves, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No.12, pp.1224-1231, 2000.
- 13) 諏訪仁・神田順: 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.633, pp.1935-1941, 2008.
- 14) 佐伯琢磨・宮崎浩徳・山本晃司・翠川三郎: 地震時の家財被害予測に関する研究－兵庫県南部地震におけるアンケート被害調査と家財被害関数の提案－, 日本建築学会構造系論文集, Vol.517, pp.45-51, 1999.
- 15) 中野一慶・梶谷義雄・多々納裕一: 地震災害による産業部門の操業水準の低下を対象とした機能的フラジリティ曲線の推計, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp.57-68, 2013.
- 16) 田村亨・杉本博之・上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, Vol.482, pp.37-46, 1994
- 17) 産業技術総合研究所, 噴出量見積もり (2011 年 1 月 26 - 27 日噴火), 2011 年火山噴火予知連絡会提出資料, https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kazan-bukai/yochiren/kiril10126_volume.pdf, 2014 年 7 月 16 日
- 18) 鹿児島県危機管理局, 霧島 (新燃岳) の噴火による被害状況, <http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/saigai/h22/documents/higaihouku0228.pdf>, 2014 年 7 月 16 日
- 19) 熊谷良雄, 大都市圏での降灰被害とリスクマネジメント, 火山工学シンポジウム「首都圏と火山災害－富士山噴火で東京は・・・?」, <http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/civil/sympo/kumagaya.pdf>, 2014 年 7 月 16 日
- 20) 鹿児島市, 道路降灰除去事業, http://www.city.kagoshima.lg.jp/_1010/shimin/3machidukuri/3-8douro/3-8-8douroiji/3-8-8-6/0001784.html, 2014 年 7 月 16 日

(投稿受理: 平成 26 年 4 月 18 日)

